

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CAMADA DE DESGASTE NA SUSTENTABILIDADE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

João Paulo C. Araújo¹, Joel R.M. Oliveira² e Hugo M.R.D. Silva²

¹ Universidade do Minho, Departamento Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
email: jparaujo@civil.uminho.pt

² Universidade do Minho, C-TAC, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Sumário

A noção de que os recursos que a humanidade tem usado não são ilimitados tem levado à implementação de práticas mais sustentáveis. Sendo os pavimentos rodoviários infraestruturas cuja construção, utilização e reabilitação provoca impactos ambientais consideráveis, torna-se indispensável a procura de novas técnicas e processos construtivos, com vista à mitigação das suas consequências. No presente artigo, para além de uma Análise do Ciclo de Vida dos pavimentos rodoviários, apresentam-se os resultados de um estudo laboratorial no qual se pretende avaliar a influência do tipo de camada de desgaste utilizada num pavimento, na variação do consumo de energia necessária à circulação.

Palavras-chave: Pavimentos Rodoviários; Sustentabilidade; Análise do Ciclo de Vida; Resistência ao Rolamento; Consumo de Combustível.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações com a sustentabilidade estão cada vez mais presentes no quotidiano das pessoas, assumindo-se já como um fator de ponderação na tomada de decisões, em complemento às vertentes económica e de durabilidade de uma determinada solução ou produto. No entanto, no caso dos pavimentos rodoviários existe ainda um grande caminho a percorrer.

Não são ainda totalmente conhecidas as consequências ambientais da construção de estradas, e em particular dos pavimentos rodoviários, ao longo do tempo, isto é, durante o seu ciclo de vida. O ciclo de vida de um pavimento rodoviário está dividido em cinco fases: (1) extração de matérias-primas e produção; (2) construção; (3) utilização; (4) conservação; (5) fim-de-vida. Cada fase é composta por vários componentes, cada um representando uma interação única entre o pavimento e o meio ambiente [1].

Atualmente, as metodologias de Análise do Ciclo de Vida que têm sido propostas no domínio da construção e reabilitação rodoviária concentram-se demasiado nas fases de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais (fases 1 e 2). No entanto, a construção e manutenção representam apenas cerca de 2% do consumo total de energia durante o ciclo de vida do pavimento, sendo os restantes 98% imputados à fase de utilização [2].

Existem ainda diversos fatores que não são tidos em devida conta, nomeadamente a qualidade superficial exigida aos pavimentos rodoviários e que se tem baseado essencialmente na segurança e comodidade dos utentes das estradas. Características como essa estão, no entanto, intimamente relacionadas com o ambiente e a sustentabilidade, podendo determinadas estruturas de pavimentos ou determinadas camadas, como a de desgaste, ter uma influência considerável na interação com este.

Nesse sentido, uma das vertentes do trabalho aqui reportado compreende o desenvolvimento de uma metodologia de análise da sustentabilidade de diferentes materiais e estruturas de pavimentos dando especial relevo ao período de exploração/utilização das estradas.

Assim, com base na metodologia entretanto desenvolvida, procede-se no presente artigo, para os pavimentos em estudo, à quantificação e comparação do consumo de energia, das emissões de gases e dos custos de cada alternativa. Os gases considerados são CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ e NO_x, embora se tenha dado especial atenção ao

CO₂, CH₄ e N₂O devido à sua contribuição para o efeito de estufa. Assim, para cada alternativa, procedeu-se à determinação do potencial de aquecimento global (GWP), uma medida da contribuição para o aquecimento global dos gases com efeito de estufa produzidos [3].

Em simultâneo, estão a decorrer estudos laboratoriais com o intuito de avaliar a influência do tipo de camada de desgaste utilizada num pavimento na variação do consumo de energia necessária à circulação. Desta forma, e tendo presentes alguns estudos que referem que os pavimentos mais rígidos e/ou menos rugosos obrigam a um menor consumo de combustível [4; 5], pretende-se determinar a influência de variáveis como a rigidez e a textura dos pavimentos na resistência ao rolamento e, por conseguinte, no consumo de combustível dos veículos.

Em resumo, sem desprezar as fases de obtenção dos materiais e construção da estrada, este trabalho dá especial atenção à fase de utilização dos pavimentos, centrando-se por isso na resistência ao rolamento e consequente variação do consumo de combustível dos veículos resultante da aplicação de diferentes camadas de desgaste. Realça-se que uma pequena redução do consumo individual de cada veículo, ao ser acumulada pela passagem de milhões de veículos ao longo do ciclo de vida do pavimento, poderá ter um peso significativo na sustentabilidade da solução, quer pela redução do consumo de combustíveis fósseis e respetivos custos associados aos utentes, quer pela redução das emissões gasosas resultantes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estruturas de pavimentos em estudo

O presente estudo tem por objetivo comparar o desempenho de duas estruturas de pavimentos flexíveis, as quais diferem na sua constituição apenas na camada de desgaste, sendo uma constituída por uma mistura convencional (AC14 surf 35/50) e a outra constituída por uma mistura construída com ligante modificado através da adição de Polietileno de Alta Densidade reciclado (AC14 surf 35/50+PEAD).

As propriedades mecânicas das misturas utilizadas nas várias camadas que constituem os pavimentos foram obtidas experimentalmente e são apresentadas na Fig.1. As espessuras das camadas serão determinadas posteriormente, com base nessas propriedades e no tráfego de projeto adiante apresentado.

| | | | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| AC14 surf 35/50 | 4376 MPa, $\nu=0.35$ | AC14 surf 35/50+PEAD | 5644 MPa, $\nu=0.35$ |
| AC20 bin 35/50 | 5931 MPa, $\nu=0.35$ | AC20 bin 35/50 | 5931 MPa, $\nu=0.35$ |
| AC20 base 35/50 | 5931 MPa, $\nu=0.35$ | AC20 base 35/50 | 5931 MPa, $\nu=0.35$ |
| Base granular | 400 MPa, $\nu=0.35$ | Base granular | 400 MPa, $\nu=0.35$ |
| Sub-base granular | 200 MPa, $\nu=0.35$ | Sub-base granular | 200 MPa, $\nu=0.35$ |
| Solo de fundação | 100 MPa, $\nu=0.40$ | Solo de fundação | 100 MPa, $\nu=0.40$ |

(a) Pavimento com camada de desgaste convencional

(b) Pav. com camada de desgaste c/ ligante modificado

Fig.1. Representação esquemática das estruturas dos pavimentos consideradas

2.2 Tráfego de projeto

Os dois pavimentos foram dimensionados de forma a suportarem o tráfego apresentado no Quadro 1, tendo presente que o ano de entrada em serviço do pavimento é o de 2012 e o seu período de vida corresponde a 20 anos, sendo expectável uma taxa de crescimento do tráfego de 1% nos primeiros 10 anos e 3% nos restantes.

A partir destes dados determinou-se o tráfego de projeto, que se traduziu na passagem de $9,2 \times 10^7$ eixos-padrão de 80 kN durante a vida útil do pavimento.

Quadro 1. Tráfego por sentido no ano de entrada em serviço do pavimento (2012)

| Veículos | Classe | Nº de veículos por dia |
|------------------------|--------|------------------------|
| Ligeiros | D | 20720 |
| | E | 454 |
| Pesados de mercadorias | F1 | 470 |
| | F2 | 293 |
| | G1 | 130 |
| | G2 | 76 |
| | H1 | 108 |
| | H2 | 191 |
| | H3 | 79 |
| Pesados de passageiros | I | 44 |

2.3 Dimensionamento dos pavimentos

Determinaram-se depois as espessuras das várias camadas dos pavimentos, recorrendo ao *software* BISAR 3.0, para que ambas as estruturas de pavimentos em estudo fossem capazes de suportar a passagem do número de eixos-padrão anteriormente referido, de acordo com os critérios de ruína da Shell. Assim, a extensão radial de tração na parte inferior da camada de base betuminosa (ε_t) e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (ε_{dp}) foram determinadas e, recorrendo às **Equações 1 e 2**, determinou-se o número de eixos-padrão admissível por cada um dos critérios, considerando-se como critério crítico (ε_t ou ε_{dp}) aquele que admite a passagem de um menor número de eixos-padrão.

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times S^{-0,36} \times N_{80}^{-0,20} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{dp} = 1,8 \times 10^{-2} \times N_{80}^{-0,25} \quad (2)$$

onde ε_t é a extensão radial de tração na parte inferior da camada de base betuminosa, V_b é o volume de betume (%), S é o módulo de rigidez da mistura (Pa), N_{80} é o tráfego de projeto e ε_{dp} a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação.

A determinação das espessuras das camadas dos pavimentos foi efetuada recorrendo a um processo iterativo até que o dano provocado ao pavimento no final da sua vida útil fosse superior a 80% e inferior a 100%. A parte granular das estruturas dos pavimentos consideradas inclui uma camada de base e uma camada de sub-base, ambas com 150 milímetros de espessura. Sobrejacentes a estas, estão as camadas ligadas: uma camada de base em macadame betuminoso (AC20 base 35/50) com 100 milímetros, no caso da estrutura com uma camada de desgaste convencional, e 90 milímetros no caso da estrutura constituída por uma camada de desgaste com ligante modificado; uma camada de regularização em macadame betuminoso (AC20 bin 35/50) com 70 milímetros; e uma camada de desgaste com 40 milímetros (AC14 surf 35/50 e AC14 surf 35/50+PEAD, dependendo da estrutura considerada). Conclui-se assim que as estruturas diferem apenas na camada de desgaste, traduzindo-se a utilização de um ligante modificado num módulo de deformabilidade superior, o qual permitirá reduzir 10 milímetros à espessura da camada de base betuminosa de forma a provocar o mesmo dano ao pavimento.

Considerando estas espessuras para o pavimento com uma camada de desgaste convencional, os valores obtidos no *software* BISAR para ε_t e ε_{dp} foram, respetivamente, $6,74 \times 10^{-5}$ e $1,72 \times 10^{-4}$. Utilizando os critérios de ruína da Shell (**Equações 1 e 2**), o número admissível de eixos padrão obtido para esta estrutura de pavimento foi de $1,19 \times 10^8$ (o menor valor entre $2,31 \times 10^8$ e $1,19 \times 10^8$), sendo neste caso o critério da deformação permanente que ditará a ruína do pavimento. Da mesma forma, para o pavimento com uma camada de desgaste com ligante modificado e menos 1 cm de espessura na camada de base betuminosa, obtiveram-se os valores de $6,96 \times 10^{-5}$ e $1,77 \times 10^{-4}$ para ε_t e ε_{dp} . Para esta estrutura, o número admissível de eixos padrão obtido foi de $1,08 \times 10^8$ (o

menor valor entre $1,97 \times 10^8$ e $1,08 \times 10^8$), sendo também neste caso o critério da deformação permanente, o critério condicionante.

2.4 Avaliação do ciclo de vida das estruturas de pavimento

Em seguida procedeu-se a uma análise comparativa da sustentabilidade das estruturas de pavimento, usando para tal a metodologia de avaliação do ciclo de vida desenvolvida no âmbito deste trabalho. Esta metodologia considera várias fases da construção rodoviária que, de forma resumida, incluem: a produção de materiais, o transporte das matérias-primas para a central betuminosa e das misturas para a obra (em camião com uma capacidade máxima de 14 toneladas), a produção das misturas betuminosas a quente, as operações de pavimentação, bem como a compactação do solo e das várias camadas que compõe o pavimento.

Neste estudo considerou-se a construção de uma estrada constituída por duas vias (uma em cada sentido, com 3,5 m de largura) e pelas bermas (com 1,0 m cada uma), perfazendo uma largura total de 9,0 m. Os cálculos foram feitos para um comprimento de referência de 1 km e, a fim de comparar as duas alternativas sem outras variáveis externas, consideraram-se as mesmas distâncias médias de transporte para duas situações (10 km).

A comparação das soluções em estudo visou, sobretudo, avaliar o consumo de energia, bem como as emissões de CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_2 e de NO_x imputáveis à construção de cada pavimento. As emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O , por se tratar de gases com efeito de estufa, foram posteriormente convertidas em emissões de CO_2 -equivalente, utilizando os fatores de conversão de 1, 23 e 296, respetivamente [6], obtendo-se dessa forma o potencial de aquecimento global (Equação 3).

$$GWP = CO_2 + 23 \cdot CH_4 + 296 \cdot N_2O \quad (3)$$

2.5 Análise económica

Também se procedeu a uma análise económica das duas opções, tendo por base os seguintes custos: 0,08 €/ton/km para o transporte em camião, 0,30 €/m² para a rega de colagem, 0,45 €/m² para a rega de impregnação e 160 €/m³ para a produção e aplicação das misturas para a camada de desgaste convencional, 180 €/m³ para a camada de desgaste com ligante modificado, 100 €/m³ para as camadas de regularização e de base em macadame betuminoso e 30 €/m³ para as camadas granulares.

2.6 Avaliação experimental da resistência ao rolamento

Para a avaliação experimental da resistência ao rolamento, recorreu-se ao ensaio de pista (conhecido na terminologia anglo-saxónica por *Wheel Tracking Test*), um ensaio simples que simula o rolamento de uma roda num pavimento rodoviário. Embora este ensaio tenha convencionalmente outro fim, pode-se de forma simplificada realizar algumas analogias entre o consumo de energia necessária para o movimento da roda, e a variação das condições de circulação, nomeadamente as características de superficiais do pavimento.



Fig.2. Ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test*

O objetivo deste trabalho consistiu assim em avaliar o consumo energético associado à resistência ao rolamento na movimentação dos veículos rodoviários, em função dos diferentes tipos de misturas betuminosas existentes na camada de desgaste do pavimento.

O estudo baseia-se na utilização do ensaio de pista para avaliar o consumo de energia elétrica necessária para fazer mover a roda do equipamento sobre diferentes misturas, com determinadas características superficiais e estruturais. Tratando-se de um equipamento que funciona através de eletricidade, este gera um determinado consumo de energia na movimentação da mesa onde está assente a roda, aplicando uma determinada carga sobre o provete suportado por essa mesma mesa. A resistência ao rolamento implícita neste mecanismo pode assemelhar-se, em certa medida, à resistência ao rolamento existente numa situação real, onde a locomoção de um veículo automóvel está associada a um determinado consumo de combustível.

A fonte de energia do equipamento possui uma ligação a um multímetro, o qual regista o consumo elétrico que passa para o motor do equipamento de ensaio de pista, que por sua vez é monitorizado no computador através de uma placa de aquisição de dados, armazenando a informação. Desta forma é possível monitorizar a energia consumida durante o ensaio.

Dado que a movimentação da mesa e da lajeta, as quais têm um determinado peso, obriga a um determinado consumo de energia, realizou-se o ensaio sem a superfície do material a ensaiar estar em contacto com a roda, durante cerca de 10 minutos, com o objetivo de registar a energia consumida apenas para suportar a carga imposta pela mesa e pela lajeta, desprezando assim o contacto roda/pavimento. Obteve-se desta forma o “consumo básico”, a partir do qual se determinará o acréscimo de energia necessário para ultrapassar a resistência no contacto da roda com a superfície do material.

Assim, produziram-se as duas misturas betuminosas consideradas nas camadas de desgaste das estruturas em estudo, isto é, um betão betuminoso convencional (AC14 surf 35/50) e um betão betuminoso com betume modificado com polietileno de alta densidade (AC14 surf 35/50+PEAD), tendo-se obtido as respetivas lajetas. Para estudar a influência das características da mistura no consumo de energia associado à passagem de uma roda na superfície foi necessário determinar as suas propriedades através dos ensaios convencionais ao nível da caracterização superficial e mecânica.

A caracterização das misturas betuminosas realizou-se com base nas normas preconizadas para determinar a sua rigidez, através de ensaios de módulo (EN 12697-26), e caracterização superficial utilizando o método da mancha de areia (EN 13036-1) e do pêndulo britânico (EN 13036-4).

Na **Fig.3** podem visualizar-se as superfícies das diferentes lajetas das misturas betuminosas produzidas, antes da realização dos ensaios de pista.



Fig.3. Aspeto da superfície das lajetas resultantes das misturas betuminosas

As lajes em estudo foram ensaiadas segundo o método da mancha de areia de modo a obter a profundidade média de textura (PMT) e através do pêndulo britânico, o qual permite obter valores correlacionáveis com o coeficiente de atrito que uma superfície possui, dando assim um indicação sobre a resistência à derrapagem de

cada superfície, sendo estes valores designados por *Pendulum test value* (PTV). Os valores da PMT e do PTV encontram-se apresentados no **Quadro 2**.



Fig.4. Ensaio da mancha de areia e pêndulo britânico

Quadro 2. Valores médios de PMT e PTV

| Camada | PMT (mm) | PTV |
|----------------------|----------|-----|
| AC14 surf 35/50 | 0,85 | 66 |
| AC14 surf 35/50+PEAD | 0,75 | 60 |

Os resultados do ensaio de mancha de areia nas lajes produzidas encontram-se dentro do expectável, isto é, a laje construída com a mistura AC14 surf 35/50+PEAD é menos rugosa que a laje AC14 surf 35/50. Tendo em conta que para texturas mais rugosas o valor de PTV será mais elevado, os resultados obtidos estão dentro desse pressuposto, sendo o valor do atrito na laje AC14 surf 35/50 superior ao da laje AC14 surf 35/50+PEAD. É também visível que a altura média de areia, determinada no ensaio de mancha de areia, é proporcional aos valores de PTV. Conclui-se desta forma que a mistura com ligante modificado (AC14 surf 35/50+PEAD) apresenta uma textura menos rugosa que a solução convencional.

De referir, por fim, que a roda especificada e existente no equipamento *Wheel Tracking Test* não será a mais indicada para a simulação de um veículo real sobre um pavimento, pelo menos do ponto de vista da avaliação do consumo energético no consumo entre a roda e a superfície das misturas, não permitindo a interpenetração da roda nas asperezas da mistura betuminosa.

2.7 Análise comparativa do consumo de combustível

Conforme referido anteriormente, uma maior resistência ao rolamento conduzirá a um maior consumo de combustível. Assim, depois de avaliada a resistência ao rolamento de cada um dos pavimentos em estudo, pretende estimar-se o consumo de combustível imputável ao tráfego de projeto anteriormente apresentado, bem como as diferenças esperadas entre os pavimentos. Para tal, tomar-se-ão como referência os valores de 9,149369 l/100km, 39,42179 l/100km e 45,37478 l/100km para os consumos médios dos veículos ligeiros, dos pesados de mercadorias e dos pesados de passageiros, respetivamente [7].

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Análise dos impactes e dos custos de construção dos pavimentos

As duas estruturas em estudo são bastante semelhantes, podendo, contudo, assinalar-se a diferença de 1 cm na camada de base betuminosa das duas soluções. Não haverá, portanto, diferenças significativas no consumo de recursos necessários à construção de cada uma delas, apresentando-se, no entanto, os resultados da sua quantificação no **Quadro 3**.

Quadro 3. Propriedades das camadas e consumo de recursos por km de pavimento construído

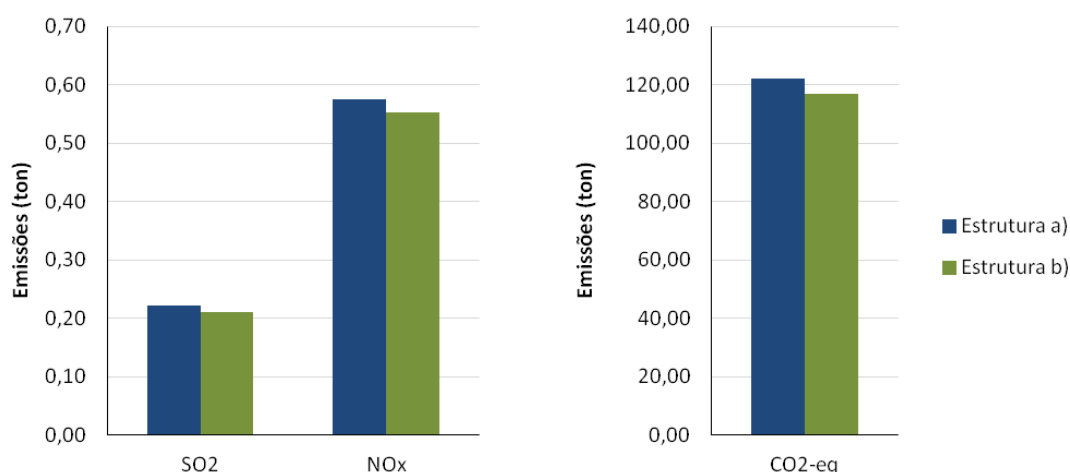
| Camada | Espessura (m) | Volume (m ³) | Agregados (ton) | Betume (ton) |
|----------------|---------------|--------------------------|-----------------|--------------|
| Desgaste | 0,04 | 360 | 820,8 | 43,2 |
| Regularização | 0,07 | 630 | 1436,4 | 75,6 |
| Base betum. a) | 0,10 | 900 | 2052,0 | 108,0 |
| Base betum. b) | 0,09 | 810 | 1846,8 | 97,2 |
| Granulares | 0,30 | 2700 | 4320,0 | - |

Conclui-se assim que a solução a) - estrutura com camada de desgaste convencional - obriga ao consumo de 8629,2 toneladas de agregados e 226,8 toneladas de betume, enquanto a solução b) - estrutura com camada de desgaste com ligante modificado - obriga ao consumo de 8424 toneladas de agregados e 216 toneladas de betume. Desta forma, a redução da espessura da camada de base betuminosa conduz a uma redução de 205,2 e 10,8 toneladas de agregados e de betume, respetivamente, por cada km construído.

Os resultados relativos ao consumo de energia e às emissões obtidas para a construção de 1 km de pavimento são apresentados no **Quadro 4** e na **Fig.5**.

Quadro 4. Consumo de energia e emissões por km de pavimento construído

| Pavimento | Consumo de energia (MJ) | Emissões (kg) | | | | | |
|--------------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | SO ₂ | NO _x | CO ₂ -eq |
| Estrutura a) | 2123878,81 | 121735,93 | 0,08 | 0,77 | 221,57 | 575,28 | 121964,20 |
| Estrutura b) | 2037178,35 | 116768,71 | 0,07 | 0,75 | 211,49 | 551,98 | 116991,46 |

**Fig.5.** Emissões de SO₂, NO_x e CO₂-eq por km de pavimento construído

Comparando as duas alternativas, conclui-se que a estrutura b), a qual considera a utilização de uma camada de desgaste com ligante modificado, permitindo a redução de 1 cm de espessura na camada de base betuminosa, é mais vantajosa em termos ambientais, permitindo uma redução do consumo de energia e das emissões gasosas libertadas para a atmosfera na ordem dos 4%.

Procedeu-se ainda a uma análise económica das duas soluções em estudo, com base nos custos unitários indicados na **Secção 2.5**. Da aplicação desses valores às soluções em análise, obtiveram-se os custos apresentados no **Quadro 5**.

Quadro 5. Propriedades das camadas e consumo de recursos por km de pavimento construído

| Camada | Transporte (€) | Regas (€) | Prod. e aplic. (€) | Total (€) |
|------------------|----------------|-----------|--------------------|-----------|
| Desgaste conv. | 1.008,00 | 2.700,00 | 57.600,00 | 61.308,00 |
| Desgaste c/ PEAD | 1.008,00 | 2.700,00 | 64.800,00 | 68.508,00 |
| Regularização | 1.792,00 | 2.700,00 | 63.000,00 | 67.492,00 |
| Base betum. a) | 2.553,60 | 4.050,00 | 90.000,00 | 96.603,60 |
| Base betum. b) | 2.284,80 | 4.050,00 | 81.000,00 | 87.334,80 |
| Granulares | 7.571,20 | - | 81.000,00 | 88.571,20 |

O custo por km dos pavimentos a) e b) é assim de 313.974,80€ e de 311.906,00€, respetivamente. A solução b) apresenta assim um custo ligeiramente inferior ao da estrutura convencional, embora essa diferença seja pouco expressiva, visto que a redução dos custos causada pela diminuição de 1 cm na camada de base são aproximadamente iguais ao aumento de custos resultante da modificação do betume com PEAD.

3.2 Análise dos impactes e dos custos de circulação

Tendo em conta o tráfego de projeto apresentado no **Quadro 1** e os valores médios dos consumos de combustível indicados na **Secção 2.7**, procedeu-se ao cálculo do combustível consumido pelo tráfego de projeto da estrada em estudo, durante o período de vida da mesma (entre 2012 e 2032), apresentando-se os resultados no **Quadro 6**.

Quadro 6. Consumo de combustível do tráfego de projeto durante a vida útil da estrada

| Veículos | Classe | Nº Acum. Veículos (2012-2032) | | Consumo (l/km) | Consumo total (l/km) |
|------------------------|--------|-------------------------------|-------------|----------------|----------------------|
| Ligeiros | D | 349.786.568 | 357.450.810 | 0,09149369 | 32.704.494 |
| | E | 7.664.242 | | | |
| Pesados de mercadorias | F1 | 7.934.348 | 22.739.503 | 0,3942179 | 8.964.319 |
| | F2 | 4.946.306 | | | |
| | G1 | 2.194.607 | | | |
| | G2 | 1.283.001 | | | |
| | H1 | 1.823.212 | | | |
| | H2 | 3.224.384 | | | |
| | H3 | 1.333.646 | | | |
| Pesados de passageiros | I | 742.790 | 742.790 | 0,4537478 | 337.039 |
| Total | | | | | 42.005.852 |

Os resultados obtidos experimentalmente, para o consumo de energia necessária à circulação, através do *Wheel Tracking Test* encontram-se apresentados no **Quadro 7**.

Quadro 7. Consumos de energia (J/s) medidos através do *Wheel Tracking Test*

| Camada de desgaste | 2 min | 10 min | 20 min | 30 min | 40 min | média |
|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| AC14 surf 35/50 | 71,6 | 73,0 | 69,2 | 68,1 | 68,0 | 69,98 |
| AC14 surf 35/50+PEAD | 69,0 | 69,6 | 69,2 | 68,0 | 66,3 | 68,42 |

Considerando os valores médios apresentados no **Quadro 7**, constata-se que a circulação na camada de desgaste com ligante modificado (AC14 surf 35/50+PEAD) ocorre com menor dispêndio de energia, permitindo uma redução de 2,23% da energia consumida necessária para circular na camada de desgaste convencional (AC14 surf 35/50).

Assim, assumindo o consumo de combustível de 42.005.852 l/km como o consumo imputável à solução convencional, a construção da mesma estrada com uma camada de desgaste com ligante modificado (AC14 surf 35/50+PEAD) permitiria reduzir este consumo em 2,23%, isto é, poupar durante o ciclo de vida do pavimento 936.398 litros por cada km de estrada construída.

Tendo em conta que em 2010 as vendas de gasóleo, gasolina sem chumbo 95 e gasolina sem chumbo 98 representaram, respetivamente, 76,17%, 21,45% e 2,38% das vendas de combustível [8], o combustível poupado com a utilização da camada de desgaste com ligante modificado seria de 713.212 litros de gasóleo por km, 200.854 litros de gasolina sem chumbo 95 por km e 22.332 litros de gasolina sem chumbo 98 por km.

Considerando a média dos preços destes 3 combustíveis, praticados entre Janeiro e Outubro de 2012 em Portugal [9], essa redução de consumos traduzir-se-ia numa poupança de 1.404.931,68 €/km, conforme demonstra o **Quadro 8**.

Quadro 8. Poupança imputável à utilização da mistura AC14 surf 35/50+PEAD na camada de desgaste

| Combustível | % de vendas em Portugal | Litros poupados | Preço médio Jan/12-Out/12 | Valor poupado por km de estrada |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
| Gasóleo | 76,17% | 713.212 | 1,451 € | 1.034.942,62 € |
| Gasolina s/ chumbo 95 | 21,45% | 200.854 | 1,650 € | 331.328,18 € |
| Gasolina s/ chumbo 98 | 2,38% | 22.332 | 1,731 € | 38.660,88 € |
| Total | | | | 1.404.931,68 € |

Perante a possibilidade de uma poupança desta ordem de grandeza por km de estrada construída, fica assim evidente que a poupança atingirá valores consideráveis, além de permitir uma redução substancial das emissões resultantes da combustão do combustível.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho pretendeu-se avaliar a influência da camada de desgaste na sustentabilidade de diferentes pavimentos rodoviários. Para tal, consideraram-se duas estruturas de pavimentos, as quais diferiam na composição da camada de desgaste, sendo uma constituída por um betão betuminoso convencional (AC14 surf 35/50) e outra por um betão betuminoso semelhante mas com ligante modificado (AC14 surf 35/50+PEAD). O dimensionamento das duas estruturas, de forma a suportarem o tráfego de projeto a que seriam sujeitas, e procurando que o dano no final da vida útil do pavimento seja o mais parecido possível entre ambas as estruturas, permitiu a redução de 1 cm da camada de base em macadame betuminoso, a qual obriga a um menor consumo de material (agregados e betume), além de permitir uma redução da energia consumida durante a produção e das emissões gasosas para a atmosfera na ordem dos 4%.

Apesar da menor espessura do pavimento, esta solução não conduz a uma redução, pelo menos considerável, dos custos de construção dado a mistura AC14 surf 35/50+PEAD apresentar um custo unitário superior ao da mistura convencional. No entanto, com base em ensaios laboratoriais, concluiu-se que a utilização desta mistura, com melhores características superficiais, conduz a uma redução da resistência ao rolamento e, consequentemente, do combustível consumido pelos veículos. Para a situação em análise, demonstrou-se que a redução de 2,23% da energia consumida, obtida em laboratório, permitiria poupar durante a vida útil do pavimento (20 anos) mais de 1.400.000 € por cada km de estrada construída.

Estes resultados carecem, no entanto, de uma validação mais profunda, considerando desde logo outras estruturas para além destas duas, considerando a influência de outras variáveis para a resistência ao rolamento (como o tipo de pneu, a irregularidade longitudinal, entre outras) mas, sobretudo, validando os resultados obtidos laboratorialmente de forma a serem extrapolados para a circulação real. Conclui-se assim que, apesar dos

resultados “animadores” aqui reportados, a avaliação da resistência ao rolamento “*in situ*” assume uma importância crucial para a continuidade deste estudo, razão pela qual se espera poder avançar em breve com o desenvolvimento de um protótipo que permita avaliar a resistência ao rolamento “*in situ*”.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro e material dado por algumas instituições. Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia - no âmbito do Projeto PLASTIROADS - PTDC/ECM/119179/2010 e do Projeto Estratégico - UI 4047 - 2011-2012.

6 REFERÊNCIAS

1. N.J. Santero; E. Masanet; A. Horvath: Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 801–809, 2011.
2. EAPA/Eurobitume: *Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements*. EAPA/Eurobitume Industry Report, March 2004.
3. NTD: *Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction*. National Technology Development, New York, Report No. C-08-02, 2009.
4. G. Taylor; J. Patten, J.: *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III*. Report Number CSTT-HVC-TR068, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2006.
5. L. Wathne: Sustainability opportunities with pavements: are we focusing on the right stuff? *International Conference on Sustainable Concrete Pavements: Practices, Challenges and Directions*, Sacramento, California, 15-17 September 2010.
6. Y. Huang; R. Bird; O. Heidrich: Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production* 17, pp. 283–296, 2009.
7. P. Gomes; M. Lopes; H. Martins; J. Carvalho; J.V. Silva; P. Teixeira: Custos e Benefícios, à escala local, de uma Ocupação Dispersa – Anexo 8: Custos internos e externos de Mobilidade em Portugal. Aveiro, 2011.
8. INE: *Anuário Estatístico de Portugal 2010*. Instituto Nacional de Estatística, I.P. ISBN 978-989-25-0104-8. Lisboa, 2011.
9. DGEG: *Petróleo, gás natural e carvão - estatísticas rápidas - outubro 2012*. Direcção Geral de Energia e Geologia, nº90, Dezembro de 2012.